

胶州湾海洋生态系统动态量化模型及其 行为特征分析与调控对策

黄 勃 刘瑞玉

(中国科学院海洋研究所)

作者根据渔获量为 99.5% 的 53 种主要经济鱼类数千个消化道样品的分析结果, 及 1980—1992 年的调查资料进行综合分析, 将胶州湾增养殖生态系统划分为 6 个子系统 (分室或分箱), 把浮游植物及沉积物中的有机质作为系统的输入。从 12 年调查资料来看, 1981 年 1—12 月份逐月资料最完整, 且同步性最好。根据这些资料, 作者对各分室建立灰微分模型, 并量化子系统的动态趋势 (各状态变量的单位为 g/m^2)。各分室状态方程运用 Laplace 变换, 求得各环节的传递函数, 综合各环节 (子系统) 可得生态系统动态模型。

用根平面法及劳斯判断准则分析了生态系统的行为特征, 结果表明, 胶州湾生态系统不稳定, 且具有发展特征, 这种状态除来自群落结构的自身变化外, 主要与捕捞过度及水质污染等周边人类活动有关。本文讨论了生态学上的前缘问题, 如稳定与不稳定、平衡与不平衡, 并结合以 Odum-Margalef 为代表的类整体论模式, 对生态系统的发展特性作了定量的分析, 提出了调控对策。

一、原理与方法

1. 状态方程的特点和系统特征判断的方法

灰状态方程与传统状态方程的区别: (1) 传统分室模型的状态方程是建立在原始数据的基础之上, 而动态量化模型的灰状态方程是建立在一次累加生成的数列上; (2) 传统状态方程需要测量各种转化率、同化率、呼吸率等生态效率参数, 而灰状态方程则不需要; (3) 传统状态方程一般须假定无时滞效应, 而灰状态方程无此假设条件, 二者相同之点为假设信息在各分室之间的转换是线性的, 且为授者控制。

生态系统数学模型建立的目的是为了建立一大堆微分方程, 而是为了更好地利用数理方法提出生物学规律及分析系统的定量特征。在进行生态系统特征分析时, 采用系统与控制理论的根平面法及劳斯判断准则, 可对判断生态系统等特征提供有力保证。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 3072 号。

收稿日期: 1996 年 9 月 6 日。

2. 劳斯判据

根据劳斯判据,生态系统含有正指数分量的充分必要条件是系统特征方程的系数中出现异号的系数,胶州湾生态系统的特征方程也出现了异号的系数,据此,可以认为胶州湾生态系统是发展的,符合发展判据条件。

3. 根平面分析

按根分布的观点,系统的动态过程有以下几种情况:(1)所有特征根为负实数,系统稳定;(2)所有特征根为负实数,或复根具有负实数,系统稳定;(3)特征方程式中含有正实根,或复根具有正实数,系统不稳定。胶州湾海洋生态系统特征符合第(3)种情况,因此属于不稳定。

二、结 果

1. 子系统(分室)的状态方程及量化动态模型

(1)浮游动物子系统:浮游动物生物量包括已鉴定的 80 种(型),其中桡足类 25 种、水螅水母类 32 种、毛颚类 8 种(型)、枝角类 3 种、其它类 12 种。利用浮游动物生物量 $[X_2^{(1)}]$ 对浮游植物 $[X_1^{(1)}]$ 及有机质 $[X_6^{(1)}]$ 建模,其状态方程为:

$$dX_2^{(1)}/dt + 0.2588425X_2^{(1)} = 3.769994 \times 10^6 X_1^{(1)} + 7.999653 \times 10^6 X_6^{(1)} \quad (1)$$

对(1)式进行 Laplace 变换可得环节的传递函数(图 1)。

(2)底栖生物子系统:底栖生物生物量包括底栖动物 330 多种,其中多毛类 156 种、软体动物 9 种、甲壳类 66 种、棘皮动物 14 种。利用底栖生物生物量 $[X_7^{(1)}]$ 及有机质含量 $[X_6^{(1)}]$ 进行建模,其状态方程为:

$$dX_7^{(1)}/dt + 0.44602X_7^{(1)} = 3.871545 \times 10^{-4} X_6^{(1)} \quad (2)$$

对(2)式进行 Laplace 变换,求得环节的传递函数(图 1)。

(3)植食性鱼类子系统:植食性鱼类包括鲮、梭鱼、斑鲮等优势种,利用植食性鱼类生物量 $[X_4^{(1)}]$ 及浮游植物生物量 $[X_1^{(1)}]$ 建模,其状态方程为:

$$dX_4^{(1)}/dt + 8.51488 \times 10^{-4} X_4^{(1)} = 7.366911 \times 10^{-4} X_1^{(1)} \quad (3)$$

t 以月为单位,在建模过程中可求得 $\Delta t = 3$,说明植食性鱼类的数量变化对浮游植物的数量有三个月的时滞效应。植食性鱼类吞食浮游植物后要过三个月以后才能看出植食性鱼类数量变化,最主要的原因是植食性鱼类不仅以活体浮游植物为食,而且还以一些碎屑为食,这些碎屑有的是直接来源于前段时间的浮游植物,这样就有非常明显的时滞效应,以至于在状态方程中直接表达出来。对(3)式进行 Laplace 变换,可求得环节的传递函数(图 1)。

(4)浮游动物食性鱼类子系统:浮游动物食性鱼类主要包括青鳞鱼、鲢、玉筋鱼、赤鼻梭鲃、中颌梭鲃、银鲳、黄鲫、鳙。利用浮游动物食性鱼类 $[X_3^{(1)}]$ 及浮游动物生物量 $[X_2^{(1)}]$ 建模,其状态方程为:

$$dX_3^{(1)}/dt - 0.1489368 X_3^{(1)} = 1.570883 \times 10^{-2} X_2^{(1)} \quad (4)$$

对(4)式进行 Laplace 变换,可得动态环节的传递函数(图 1)。

(5)底栖生物食性鱼类子系统:底栖生物食性鱼类子系统包括鳊、焦氏舌鳎、木叶鲽、六丝矛尾、鰕虎鱼、绿鳍马面鲀、黄盖鲽、黑鲷、短吻三刺鲀、石鲽、长绵鲷、皱唇鲨、短吻舌

鳎、刺头梅童鱼、小黄鱼、条鳎、半滑舌鳎、细条天竺鱼、欧氏六线鱼、皮氏叫姑鱼、星鲽、黑鲷、孔鳐、中国团扇鳐、光魮、黄姑鱼、矛尾复、虎鱼、海鳗、细纹狮子鱼、绿鳍鱼、桂皮斑鲆、鳙、斜带髯鳎和白姑鱼。利用底栖生物食性鱼类生物量 $[X_6^{(1)}]$ 及底栖生物生物量 $[X_7^{(1)}]$ 建模,其状态方程为:

$$dX_6^{(1)}/dt - 9.295 \times 10^{-8} X_8^{(1)} = 1.00 \times 10^{-8} X_7^{(1)} \quad (5)$$

对(5)式进行 Laplace 变换,求得环节的传递函数(图 1)。

(6)肉食性鱼类子系统:肉食性鱼类包括 8 种,它们是牙鲆、油鱼子、带鱼、白斑星鲨、鲈、黄鲛、星鳗、长蛇鳐。利用肉食性鱼类生物量 $X_5^{(1)}$ 、植食性鱼类生物量 $X_4^{(1)}$ 及底栖生物生物量 $X_7^{(1)}$ 建模,其状态方程为:

$$dX_5^{(1)}/dt - 2.986500 X_5^{(1)} = 3.472500 X_2^{(1)} + 4.725000 \times 10^{-4} X_7^{(1)} \quad (6)$$

对(6)式进行 Laplace 变换,求得各环节的传递函数(图 1)。

合并 1—6 六个子系统传递函数,若把有机质与浮游植物看作胶州湾生态系统的输入,则可得到动态量化模型(图 1)。

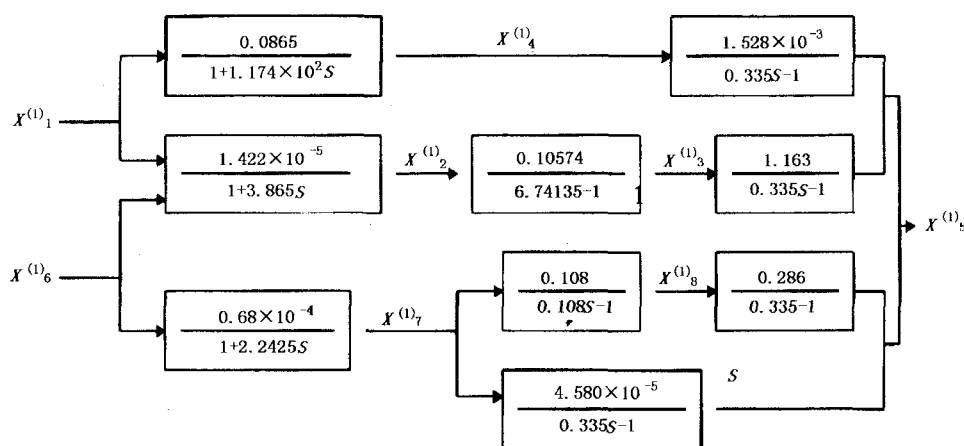


图 1 生态系统传递函数模型

2. 生态系统行为特征分析

胶州湾生态系统从浮游植物、有机质的输入经复杂的食物网络进行物质与能量的传递,在生态系统中其传递的终端上为肉食性鱼类,该系统的特点可由 $[X_1^{(1)} + X_6^{(1)}]/X_5^{(1)}$ 的特征多项式来判断。系统的传递函数为: $W(S) = R(S)/Q(S) = [X_1^{(1)} + X_6^{(1)}]/X_5^{(1)}$

系统的特征多项式为:

$$\begin{aligned} Q(S) &= (1 + 0.042S) \times (1 + 117.4S) \times (6.143S - 1) \times (1 + 0.492S) \times (1 + 3.865S) \\ &\quad \times (1 + 2242S)(0.0108S - 1) \\ &= 13.95S^7 + 239.1S^6 - 253.2S^5 - 7747.41S^4 - 3450.462S^3 - 68.4S^2 \\ &\quad - 122.9S - 1 \end{aligned}$$

特征多项式的根: $S_1 = -23.8, S_2 = -0.0085, S_3 = 0.163, S_4 = -2.03, S_5 = -0.26, S_6 = -0.446, S_7 = 9.26$ 。

从根平面的分析来看,胶州湾生态系统的特征多项式的根符合根平面分析的条件(3),

因此,胶州湾生态系统发展且不稳定。根平面不仅可判断系统的稳定特征,而且还可判断系统的发展特性,根平面实质是复平面,根平面由左、右两部分组成(图 2)。

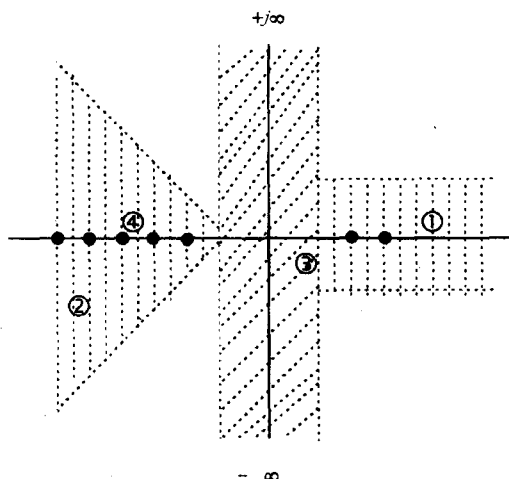


图 2 生态系统根平面的发展特性

- ①生态系统理想发展区;②生态系统容许发展区;③生态系统发展的禁区;
④表示胶州湾生态系统特征多项式根值所在位置

三、讨 论

胶州湾生态系统的特征多项式的根位于实轴上,有正实根也有负实根。因此,系统是发展且不稳定的。一般来说,当从外部给系统一个投入,若系统能自我发展,则认为系统具有活力,一个具有活力的系统其特征根必须包含有正实根或正实部的根。胶州湾生态系统特征根有两个: $S_6=0.163$, $S_7=9.26$,均为正实根,所以生态系统具有活力,即具有投入能使系统自我发展的“活力”特征,应用于海洋农牧化上,就是采用增、养殖方法,看来这种方法无论是在实际上还是在理论上都是可行的。生态系统周年内已基本完成一个循环,但系统不稳定发展,从分析结果来看主要原因是捕捞过度。鱼虾种苗放流增殖是一种措施,但要从限制捕捞量入手,捕捞量的多少应从湾内总生物量和生产力来估算,要想使系统既要发展又无摆动,即达到生态系统理想的发展区,使系统具有活力,能自我发展,就应着眼于资源的补充量及剩余量。当然环境污染也是导致不稳定性发展的因素,下面详细讨论。

1. 稳定性

稳定性的定义有多种(Pimm *et al.*, 1977),一般来说稳定性定义为生态系统抵抗各种干扰和维持内部稳定状态的能力,有关系统的稳定性问题的争论,与对稳定性概念的不同理解有关,目前有关专家把生态系统的稳定性分为两方面,即抵抗力与恢复力,这种提法使多种争议得到统一。生态学主导思想的一个重要变革反映在研究重点的转移上,由强调平衡、稳定性、均质性、确定性和单尺度或小尺度的现象到重视非平衡、不稳定性、异质性、不确定性,以及多重尺度和等级特征,这是目前大家争议的问题,归根到底是人们哲学思想与方法论在这个问题上的分歧。

胶州湾生态系统处于不稳定状态,这种不稳定主要是由于捕捞过度,物种作为生态系

统中的组成元素,与附近环境的污染也有关系。胶州湾生态系统属于水域型生态系统,对于这种不稳定,从生态系统发展性特征分析来看是可以控制与优化的。宏观控制的目标是限制捕捞与治理水质污染,治理的方法是利用水域生态系统恢复力高的特点进行治理。当然,把生态系统恢复到原来平衡点是不现实也是不科学的,为达到持续利用生物资源,限制捕捞量、增殖放流措施是必不可少的手段。另外,对胶州湾周边地带养殖的合理布局规划时,应从系统的角度去考虑,尤其应注意生态系统行为特征的走向。

2. 发展性

Margalef(1969)和 Odum(1971)从整体论出发指出群落和生态系统在功能方面具有共同特征,而不是在结构方面的具体差异,Margalef(1969)指出演替相当于一种控制论系统的自现过程,在此过程中信息不断增加,生态系统的总效率不断增加,Odum(1971)认为,发展是有序的,有方向性的,在发展过程中,每时间单位可利用能流支持的生物量及生物共约互惠作用未达到极大值。文章讨论发展特性时采用 Odum(1971)及与之相似的 Margalef(1969)的观点,实践证明,他们的类态体论可为大多数生态学家所接受。

胶州湾生态系统具有发展特征,是与系统不稳定相对应的,系统的发展与进化模式是由于系统内部的结构与功能的不断改变所致,这种改变与上述的人为因素有关,并可推断系统处于发展中有关特征指标(模式)值的特点为:(1)群落能量特征为总生产量与群落呼吸之比(R/R)不等于1;(2)稳定性不好;(3)熵不低。当然不稳定发展与物种元素的季节性迁移、群落季节性变化也有一定的关系。这些变化是系统内部的行为,灰色系统理论是把各个指标值看成综合因素影响的结果,而决非某一个因子,这方面问题的讨论可参考作者其它论著。

参 考 文 献

- 邓聚龙,1985,灰色系统(社会,经济),国防工业出版社,25-106。
- 刘瑞玉,1992,胶州湾生态学和生物资源,科学出版社,110-429。
- 黄勃、刘瑞玉,1996,系统分析在渔业资源生态环境工程研究中的应用,海洋科学,6:18-20。
- Margalef, R., 1969, diversity and stchility in ecological system, Brookhaven symp Biol, U. S. A, 22-37.
- Odum, E. P. 1971, Fundamentals of ecology, W. B. Saunders, Philadelphia, 378-980.
- Pimm, S. L. and J. L. Lawton 1977, Number of trophic levels in ecological communities, *Nature*, **268**(5168): 329-331.
- Washington, H. G., 1982, Diversity, biotic and sinsilarity indices, a review with special relevance to aquatic ecosystems, *water Res.*, **18**(6): 653-694.

CONSTRUCTION OF JIAOZHOU BAY MARINE ECOSYSTEM MODELS, ANALYSIS OF THEIR CHARACTERISTICS AND CONTROLL MEASURES*

Huang Bo, Liu Ruiyu

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences)

ABSTRACT

Based on the general ecosystem protoplast and results of analysis of the contents of 2607 fish individuals belonging to 53 species in the Jiaozhou Bay ecosystem, the ecosystem is divided into six subsystems: zoophankton $X_2^{(1)}$, benthos $X_7^{(1)}$, detritus feeders $X_4^{(1)}$, zooplankton feeders $X_3^{(1)}$, zoobenthos feeders $X_8^{(1)}$ and nekton feeders $X_5^{(1)}$, plankton $X_1^{(1)}$, and the content of organic matter in sediment $X_6^{(1)}$ were regarded as input and the nekton feeders as output, over the year mooth by month invastigation data was used to develop the ecosystem model by applying grey system theory, whose differential equations are as follows:

$$dX_2^{(1)}/dt + 0.2588425X_2^{(1)} = 3.769994 \times 10^6 X_1^{(1)} + 7.999653 \times 10^6 X_6^{(1)} \quad (1)$$

$$dX_7^{(1)}/dt + 0.44602X_7^{(1)} = 3.871545 \times 10^{-4} X_6^{(1)} \quad (2)$$

$$dX_4^{(1)}/dt + 8.51488 \times 10^{-4} X_4^{(1)} = 7.366911 \times 10^{-4} X_{dt}^{(1)} \quad (3)$$

$$dX_3^{(1)}/dt - 0.1489368 X_3^{(1)} = 1.570883 \times 10^{-2} X_2^{(1)} \quad (4)$$

$$dX_6^{(1)}/dt - 9.295 \times 10^{-8} X_8^{(1)} = 1.00 \times 10^{-8} X_7^{(1)} \quad (5)$$

$$dX_5^{(1)}/dt - 2.986500 X_5^{(1)} = 3.472500 X_7^{(1)} + 4.725000 \times 10^{-4} X_7^{(1)} \quad (6)$$

Laplace transform technique was used to convert the grey differential equations into transfer functions, the ecosystem model structure is shown in Fig. 1. The transfer function of the ecosystem is:

$$W(S) = R(S)/Q(S) = (X_1^{(1)} + X_6^{(1)})/X_5^{(1)}$$

Where $Q(S)$ is the eigenpolynomial of the ecosystem, $Q(S) = (1 + 0.042S) \times (1 + 117.4S) \times (6.143S - 1) \times (1 + 0.492S) \times (1 + 3.866S) \times (1 + 2242S) \times (0.0108S - 1)$ and S is Laplacian. So we can get the roots of the ecosystem eigenpolynomial: $S_1 = -23.8$, $S_2 = -0.0085$, $S_3 = 0.163$, $S_4 = -2.03$, $S_5 = -0.26$, $S_6 = -0.446$, $S_7 = 9.26$. Because S is a real number (S_1, S_2, S_4, S_5, S_6 : negative number; S_3, S_7 are positive numbers), according to the control theory and grey system theory, the ecosystem is unstable and developing.

This unstability results from unstable structure of the ecosystem, where many economically important populations are overfished, so the biomass of $X_3^{(1)}$, $X_4^{(1)}$, $X_5^{(1)}$,

* Contribution No. 3072 from Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences.

$X_7^{(1)}, X_8^{(1)}$ such as that of valuable fishes, shrimps and some shellfishes decreases, while the biomass of low trophic level organisms such as plankton, zooplankton, some benthic species, increases.

In order to keep the ecosystem stable, improve the ecosystem structure, increase biomass of fish and invertebrate stocks, young fishes and invertebrates should be released into the sea and fishery management should be strengthened.